



## Auscultation micro-sismique de l'ennoyage du site expérimental de Tressange - Bassin ferrifère lorrain

Jérôme Wassermann, Gloria Senfaute, Françoise Homand, David Amitrano

### ► To cite this version:

Jérôme Wassermann, Gloria Senfaute, Françoise Homand, David Amitrano. Auscultation micro-sismique de l'ennoyage du site expérimental de Tressange - Bassin ferrifère lorrain. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.425-434. ineris-00972459

**HAL Id: ineris-00972459**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972459>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# AUSCULTATION MICRO-SISMIQUE DE L'ENNOYAGE DU SITE EXPERIMENTAL DE TRESSANGE – BASSIN FERRIFERE LORRAIN

## MICROSEISMIC MONITORING DURING THE PARTIAL FLOODING OF AN IRON ORE MINE AT TRESSANGE EXPERIMENTAL SITE (LORRAINE, EAST FRANCE)

J. WASSERMANN, G. SENFAUTE, F. HOMAND, D. AMITRANO  
*LaEGO-INPL-INNERIS, Nancy, France*

**RÉSUMÉ** – Dans le but de mieux comprendre les processus d'endommagement des ouvrages miniers susceptibles de se produire lors de leur ennoyage, un site expérimental, situé dans le stot de Tressange, a été ennoyé et surveillé pendant un an et demi notamment par auscultation micro-sismique. L'analyse de l'activité micro-sismique a montré l'existence de deux classes d'événements bien distinctes qui semblent être associées à des phénomènes différents. L'analyse énergétique a mis en évidence une relation entre la montée de l'eau dans la cavité et l'apparition des événements microsismiques.

**ABSTRACT** – In order to assess damage induced by flooding of abandoned underground iron mine, an experimental site has been flooded. A microseismic activity has been recorded during the experiment. Two different types of microseismic events were identified and are associated to different mechanisms. Analysis of seismic released energy of these events shows clearly a relation between the flooding effect of room-pillars and the occurrence of strong microseismic events.

### 1. Introduction

Les méthodes d'exploitation mises en oeuvre dans le Bassin ferrifère ont été de deux catégories, selon qu'elles laissent ou non subsister des vides souterrains. La méthode d'exploitation totale, menée sous les zones inoccupées, a consisté à tracer des galeries découpant des piliers, qui sont ensuite repris au cours de l'opération de défilage provoquant l'effondrement du toit. Les roches ainsi éboulées et foisonnées subissent ensuite un tassement, après un certain temps on n'observe plus de mouvement en surface. La méthode d'exploitation partielle, pratiquée sous les villes pour préserver les habitations, a consisté à laisser des piliers sous les zones habitées et les infrastructures. Les piliers restant en place étaient sensés supporter de façon pérenne l'ensemble du recouvrement. L'arrêt de ces exploitations a été suivi par des manifestations de désordres importants en surface. Récemment, certains de ces désordres ont été consécutifs à l'ennoyage des ouvrages miniers (galeries, piliers, niveaux intercalaires) provoqué par l'arrêt du pompage d'exhaure. Afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de ces phénomènes, des expérimentations in situ ont été menées par le Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains (GISOS). Un site expérimental situé dans un stot de protection au Nord du Bassin ferrifère lorrain a ainsi été ennoyé. L'objectif est d'étudier l'influence de l'eau sur le comportement des ouvrages miniers et de tenter notamment de répondre au problème consécutif aux désordres apparus récemment. L'ennoyage induit-il des dégradations des propriétés physiques autrement dit un endommagement des ouvrages miniers pouvant conduire à leur rupture ?

L'endommagement d'un massif rocheux (ici un ouvrage minier) peut être dû à l'ouverture de fissures, leur propagation et coalescence (conduisant à la formation de fractures), ainsi qu'à la croissance de fractures. Ces processus permettent une libération rapide d'énergie de déformation qui se manifeste par des micro-séismes. Ces derniers sont des ondes élastiques transitoires qui se propagent à travers le milieu rocheux. Les micro-séismes apparaissent ainsi comme des manifestations de la dégradation ou de l'endommagement du massif rocheux ou encore de l'ouvrage minier. L'auscultation micro-sismique a été utilisée de part le monde afin de

surveiller des exploitations souterraines profondes et de prévenir des coups de terrains (« rockbursts ») : en Afrique du Sud (Spottiswoode et McGarr, 1975), en Pologne (Gibowicz, 1985), ou encore en France (Senfaute et al., 1997). Une telle auscultation doit également permettre de suivre l'influence de l'eau sur les ouvrages miniers.

Après une description succincte du site expérimental, nous présentons les dispositifs d'écoute micro-sismique puis l'expérimentation dite de chute provoquée de blocs réalisée dans le but de mieux comprendre les mécanismes de ce type de dégradation et d'identifier les événements micro-sismiques associés. L'activité micro-sismique enregistrée durant l'ennoyage est ensuite exposée et corrélée à d'autres observations également réalisées sur le site. Les données sismo-acoustiques étudiées ont été enregistrées entre mars 2002 (date de démarrage des expérimentations et de l'ennoyage) et le 13 août 2003 (fin du dénoyage du site).

## 2. Description succincte du site expérimental

Le site expérimental fait partie de la mine de Tressange située au Nord du Bassin ferrifère lorrain. La méthode en chambres et piliers abandonnés qui a été employée est représentative des exploitations du minerai de fer en Lorraine. La zone ennoyée est située dans la couche brune du stot (figure 1a); elle est délimitée par dix barrières étanches, et englobe ainsi entièrement deux piliers (G et F) et partiellement dix autres (figure 1b). Le taux de défrêtement de la zone est de l'ordre de 36 % (Al Heib, 2000), les galeries sont plus ou moins rectangulaires (5 m de large et 3 m de haut), le site pilote en couche brune représente ainsi un volume d'eau d'environ 3700 m<sup>3</sup> (Lopes, 2002). L'ennoyage concerne également l'intercalaire marneux grise-brune (figure 1a) au sein duquel ont été forés les principaux sondages destinés à accueillir les capteurs micro-sismiques.

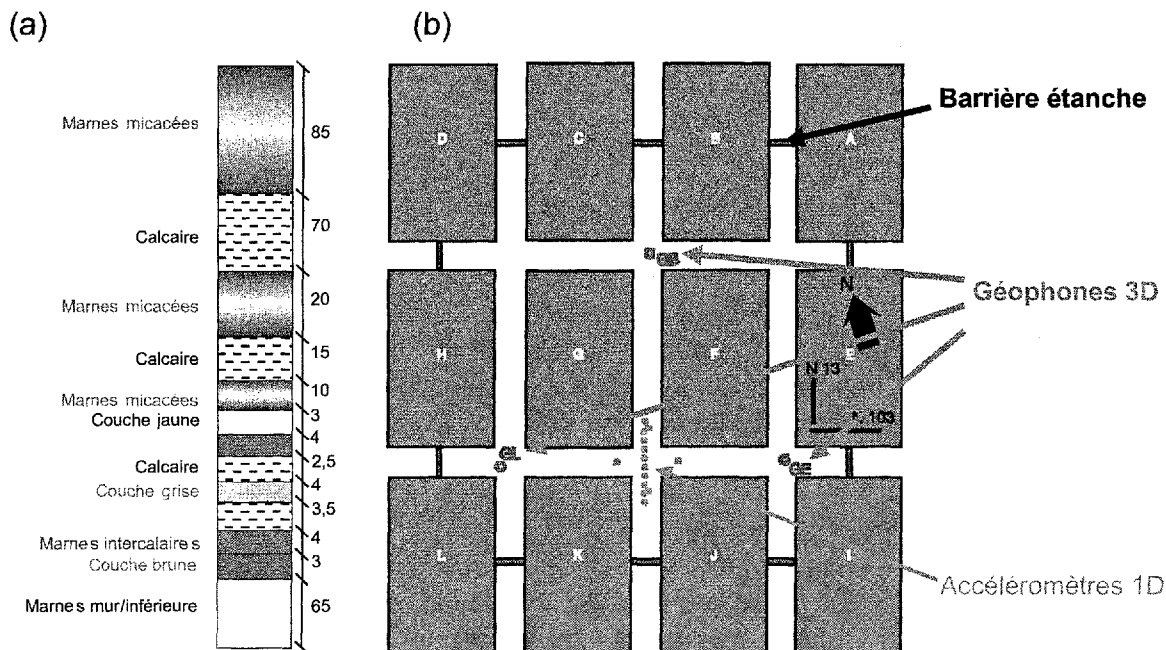


Figure 1. Colonne stratigraphique (a) et géométrie du site expérimental ennoyé (b).

## 3. Dispositifs expérimentaux

L'auscultation micro-sismique a consisté à écouter et enregistrer les événements micro-sismiques qui se sont manifestés durant les différentes phases de l'ennoyage du site

expérimental (de mars 2002 à août 2003). Ce suivi micro-sismique de l'influence de l'eau sur le comportement des ouvrages miniers a été réalisé via des réseaux de capteurs décrits ci-après.

### **3.1 Réseaux d'écoute sismo-acoustique**

Deux réseaux de capteurs ont été installés (figure 1b) :

- un premier réseau, constitué de trois stations tridirectionnelles de type géophone (deux stations fixes et une station mobile) ayant une sensibilité maximum pour des fréquences comprises entre 40 Hz et 1,5 kHz et qui ont été placées dans des sondages dans l'intercalaire entre les couches grise et brune ;
- un deuxième réseau composé d'accéléromètres comportant une bande passante fréquentielle comprise entre 20 Hz et 2,5 kHz et alignés au toit de la couche brune ;

Le réseau de géophones a une géométrie permettant une bonne couverture des zones instables de l'intercalaire et des piliers ennoyés (les piliers F et G notamment). Les résultats présentés dans cet article concernent spécifiquement les enregistrements obtenus à partir de ce réseau, les enregistrements effectués par le réseau d'accéléromètres est utilisé pour vérifier ou valider des interprétations obtenues à partir des géophones.

### **3.2 Expérimentation de chute provoquée de blocs**

Les chutes de blocs peuvent être considérées comme le résultat de dégradations importantes d'une galerie, et comme les prémices de la rupture du toit de cette dernière. Une expérience dite « chute provoquée de blocs » a donc été mise en œuvre afin de mieux comprendre les mécanismes de ce type de dégradations, et d'identifier les signatures micro-sismiques associées aux processus de fissuration conduisant au décrochement de blocs au toit de la cellule ennoyée.

Un forage non débouchant a été creusé dans l'intercalaire grise-brune. Le fond du forage se situe à environ 0,50 m du toit de la cellule ennoyée en couche brune. L'expérimentation consiste à exercer une poussée sur le fond du forage afin de détacher des blocs du toit. Le dispositif expérimental est constitué d'une colonne de réaction qui s'appuie sur le toit de la couche grise, d'un vérin, et de tiges dans le forage (figure 2a). Ainsi l'expérimentation consiste en une augmentation progressive de charge jusqu'au décrochement provoqué de blocs, alors qu'une chute naturelle a lieu à charge quasiment constante.

## **4. Description et analyse de l'activité micro-sismique**

L'auscultation micro-sismique a débuté dès la mise en place du réseau de géophones, c'est-à-dire une semaine avant le début de l'ennoyage du site expérimental (15 mars 2002). Des événements extérieurs ont été enregistrés et séparés des événements micro-sismiques associés à l'endommagement du site expérimental. Il s'agit de deux séismes (celui d'Aix-La-Chapelle du 22 juillet 2003, et celui de Saint Dié du 22 février 2003), de tirs de carrière située à 6 km du site, et d'événements associés aux interventions humaines dans la mine.

### **4.1 Activité micro-sismique durant l'expérimentation d'ennoyage du site**

L'auscultation micro-sismique a débuté une semaine avant le début de la mise en eau du site (15 mars 2002). 134 événements micro-sismiques ont été enregistrés via le réseau de géophones (figure 3a). L'activité, c'est-à-dire le nombre cumulé d'événements exprimé en fonction du temps, apparaît soutenue durant la montée de l'eau dans la cavité (figure 3b). Lorsque l'eau a atteint un niveau stationnaire (ennoyage complet), l'activité acoustique semble diminuer, elle devient très importante durant la phase de dénoyage.

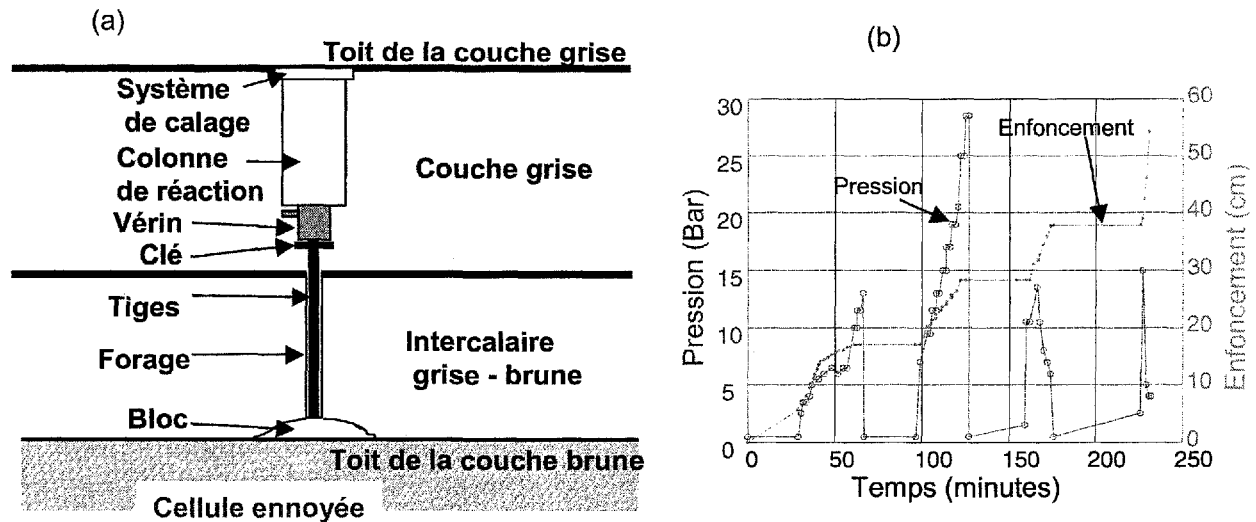


Figure 2. (a) Schéma du dispositif expérimental de l'expérimentation de chute provoquée de blocs ; (b) les quatre cycles chargement-déchargement et l'enfoncement des tiges dans le forage.

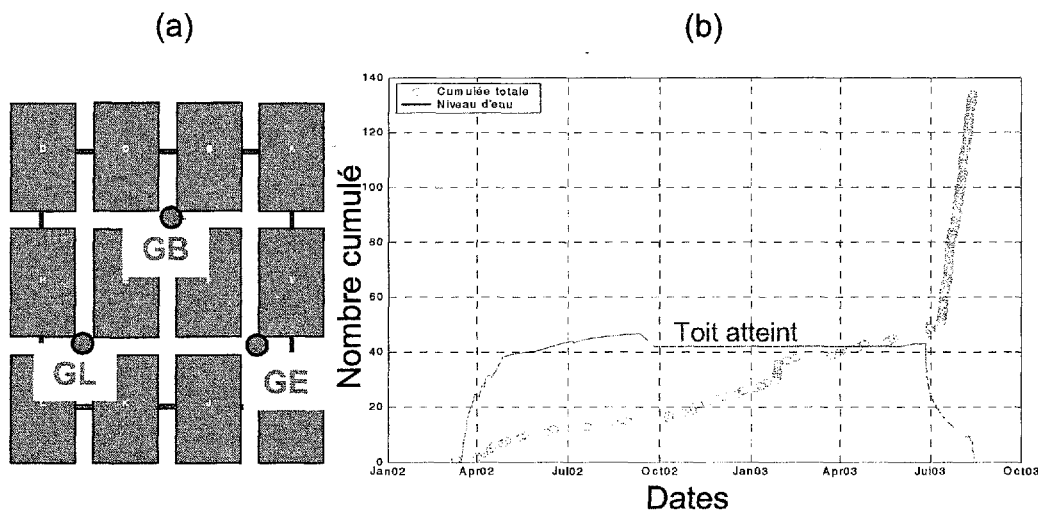


Figure 3. (a) Schéma de localisation des 3 stations géophones utilisées dans la classification spatiale des événements micro-sismiques. (b) Activité micro-sismique enregistrée pendant toute la durée de surveillance du site expérimental sur les géophones et niveau d'eau par rapport au sol de la cellule ennoyée.

Afin d'interpréter cette activité et d'essayer de comprendre son origine, un classement spatial des événements puis des analyses temporelles, énergétiques, et fréquentielles ont été effectués. La localisation de l'activité micro-sismique enregistrée est essentielle dans l'interprétation des événements car elle permet de situer les instabilités mécaniques à l'origine des événements. Etant donné les pannes de certaines voies horizontales des géophones et puisque la plupart des événements n'ont été enregistrés que sur une seule station de mesure, une classification spatiale des événements micro-sismiques a donc été réalisée. Cette approche de localisation a consisté en un classement en fonction des stations géophones ayant enregistré l'événement et les temps d'arrivée au capteur.

L'ensemble des 134 événements enregistrés a ainsi pu être divisé en trois classes d'événements (figure 4a) :

- la classe A regroupe des événements d'impact local car ils n'ont été enregistrés que par une seule station géophone ;
- la classe B englobe des événements enregistrés sur deux géophones ;
- enfin, la classe C comporte des événements enregistrés par les trois stations de mesure.

La majorité des événements de classe A ont été enregistrés via le géophone GL. L'analyse des temps d'arrivée des événements de classe B a montré que le géophone GL était systématiquement le premier à capter l'onde micro-sismique. Il semble que la ou les sources des événements de classe B soient situées non loin de la station GL. Ainsi les événements de classe B ont été intégrés dans la classe A. L'analyse des temps d'arrivée de l'onde pour les événements de classe C a montré que la source n'est pas particulièrement plus proche d'un capteur que d'un autre. Le mécanisme responsable de l'apparition de ces événements est sans doute différent de celui des événements très localisés (autour du géophone GL, figures 1 et 3a) identifiés par la classe A.

Lorsque l'on considère l'évolution temporelle du nombre cumulé d'événements par classe (figure 4b), on peut tout d'abord remarquer la manifestation relativement ponctuelle des événements de classe A. Deux regroupements significatifs d'événements sont observés : un fin janvier 2003 et un pendant le dénoyage du site. C'est pendant le dénoyage que la plupart des événements de cette classe se produisent. Les événements de classe C sont quant à eux dispersés plus ou moins régulièrement dans le temps pendant toute la durée des expérimentations (ennoyage et dénoyage du site). Il n'y a pas de regroupement significatif.

Les deux classes d'événements distinguées par une approche de localisation se différencient également par leurs activités. Il semble bien que les événements de classe A et ceux de classe C, aient des mécanismes de sources différents. L'analyse fréquentielle des signaux associés à chaque événement confirme cette hypothèse. La figure 5a présente la répartition des couples amplitude maximale ( $A_{max}$ ) et fréquence d'amplitude maximale ( $f_{max}$ ), le spectre de chaque événement étant obtenu par transformée de Fourier rapide. Environ 97 % des événements sont caractérisés par des amplitudes maximales inférieures à  $0,4 \cdot 10^{-4}$  m/s et des fréquences d'amplitude maximale comprises entre 50 et 250 Hz. On observe que les événements de classe A ont un contenu fréquentiel plus élevé que celui des événements de la classe C. Ceci est cohérent avec la classification spatiale réalisée. En effet, les événements de classe A, d'impact local (enregistrés en majorité via le géophone GL), ont un contenu fréquentiel peu filtré car le milieu rocheux est traversé sur une plus courte distance, la source se situant près du capteur GL. Les événements de classe C ont un impact plus régional (enregistrés sur les trois stations de mesure), leur contenu fréquentiel est filtré vers les basses fréquences par le milieu rocheux traversé sur une distance importante.

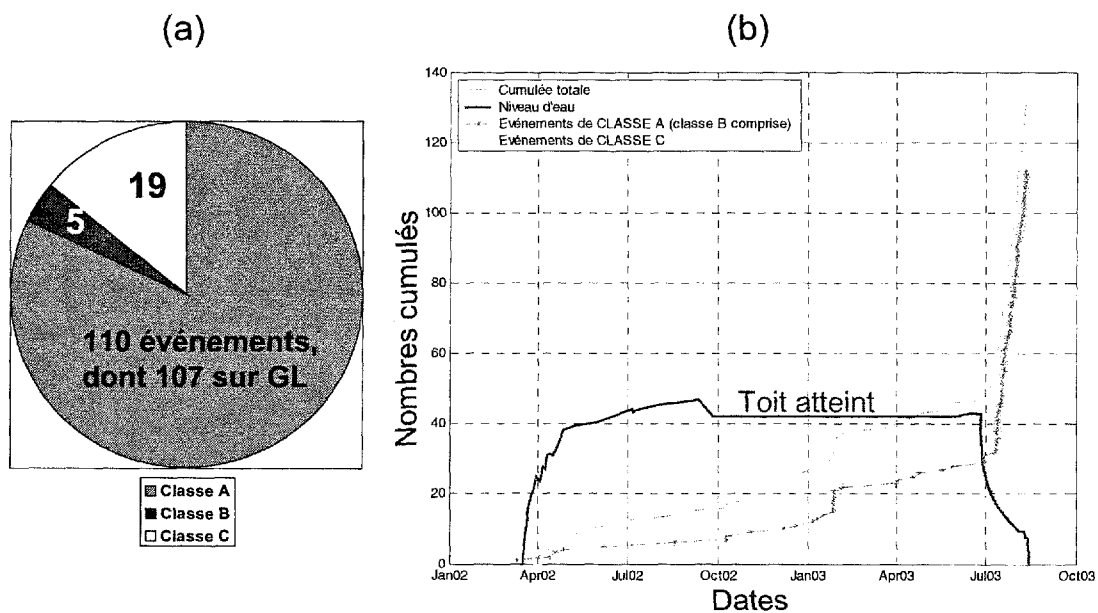


Figure 4. (a) Classification spatiale des événements (le nombre total d'événements microsismiques enregistrés est de 134). (b) Evolution temporelle des nombres cumulés des événements de classe A, des événements de classe C et niveau d'eau au sein de la cellule ennoyée.

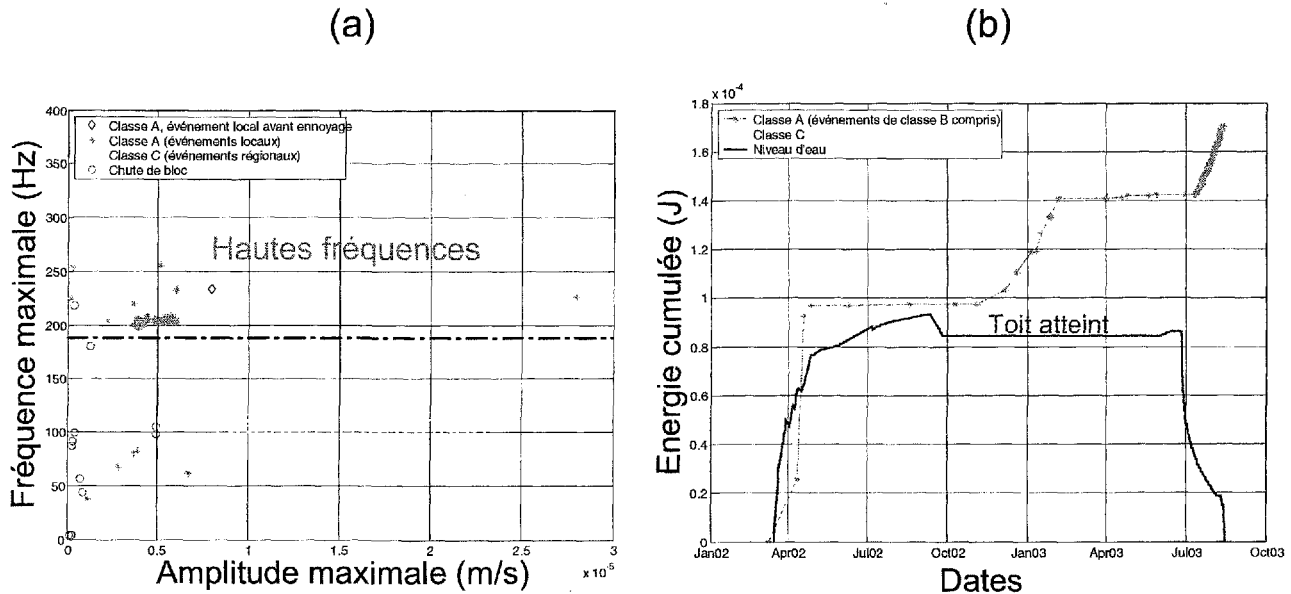


Figure 5. (a) Répartition des couples Amplitude maximale – Fréquence d'amplitude maximale ( $A_{max}, f_{max}$ ) de chaque événement enregistré par les géophones. (b) Energies cumulées des signaux des événements et niveau d'eau à l'intérieur du site expérimental.

L'analyse en terme d'énergie du signal (figure 5b) montre que les événements micro-sismiques les plus forts, quelle que soit la classe d'événements, se sont produits environ 15 jours après le démarrage de la mise en eau du site et uniquement pendant la montée de l'eau dans la cavité. La hauteur d'eau était à environ 2,5 mètres quand le premier événement fort est arrivé (événement de classe C), d'environ trois mètres lors du deuxième événement fort (événement classe A) et à un peu plus de trois mètres lors du troisième. Après l'ennoyage complet du site expérimental, l'énergie des événements micro-sismiques reste relativement faible et aucun autre événement significativement énergétique ne s'est manifesté.

#### 4.2 Mécanismes de sources potentiels. Apport de l'activité micro-sismique enregistrée durant l'expérimentation de chute provoquée de blocs

##### 4.2.1 Mécanismes de sources potentiels

Parmi les 134 événements micro-sismiques enregistrés pendant toute la durée des expérimentations d'ennoyage et de dénoyage du site expérimental, deux classes principales d'événements ont été identifiées.

- une classe d'événements (classe A) qui serait associée à une source très locale, dans le secteur où se situe le capteur GL (les géophones sont situés dans des sondages au sein de l'intercalaire grise-brune). Les signaux ont un contenu fréquentiel assez élevé (supérieur à 200 Hz). Ces résultats indiquent que la source à l'origine de ces événements serait associée à des micro-ruptures ou au rejeu de petites fractures préexistantes au sein de l'intercalaire, proches du géophone GL ;
- une deuxième classe d'événements (classe C) très différente de la classe A sur deux points essentiels : la fréquence des signaux est nettement moins élevée que celle des événements de la classe A, les événements ont été enregistrés par la totalité des capteurs du réseau. Cela signifie que la source de ces événements a un impact plus régional, à l'échelle du site, que celle des événements de classe A. Nous n'avons pas pu déterminer d'indicateurs sur l'endroit où se situeraient ces événements. Il est possible qu'ils soient générés par des fractures importantes créées lors de la mise en eau du site ou par la propagation de fractures préexistantes dans les piliers ou dans l'intercalaire. Il est aussi probable qu'une partie de ces événements soit associée à des chutes de blocs. Cette dernière hypothèse a pu être mise à l'épreuve lors de l'expérimentation de chute provoquée de blocs dont le dispositif expérimental a été exposé dans le 3.2.

#### 4.2.2 Apport de l'activité micro-sismique enregistrée durant l'expérimentation de chute provoquée de blocs

Douze événements micro-sismiques ont été enregistrés durant l'expérimentation de chute de blocs dont le protocole expérimental et l'objectif ont été précisés dans le paragraphe 3.2. La répartition temporelle de ces événements est exposée sur la figure 6a. 7 événements ont été ainsi identifiés durant les cycles 2 et 3, ils ont été enregistrés par les réseaux de géophones et d'accéléromètres (figure 1). Les 5 derniers événements se sont produits durant le dernier cycle pendant lequel s'est produite la chute de blocs proprement dite. Ils ont été enregistrés par tous les réseaux, que ce soit le réseau de géophones, ou celui des accéléromètres, ce sont également les événements les plus énergétiques (figure 6b).

Le cycle 1 de l'historique de chargement (figures 2b et 6a) interprété comme étant la phase de compression des débris du forage ne semble être associée à aucun mécanisme de fracturation au sein de l'intercalaire, aucun événement micro-sismique n'est enregistré. La fracturation se produirait dès le cycle 2, lorsque les événements micro-sismiques sont enregistrés, et se propagerait jusqu'à atteindre le toit de la cellule ennoyée. Les événements des cycles 2 et 3, seraient ainsi associés à des processus d'initiation et de propagation de fractures dus à la mise en charge de l'intercalaire grise-brune au fond du forage. Les événements de la phase finale, enregistrés par tous les réseaux de capteurs, seraient dus aux processus de décrochement de blocs au toit de la cellule ennoyée, qui se produiraient lorsque les fractures atteignent la zone de contact entre le toit de la cellule et l'eau.

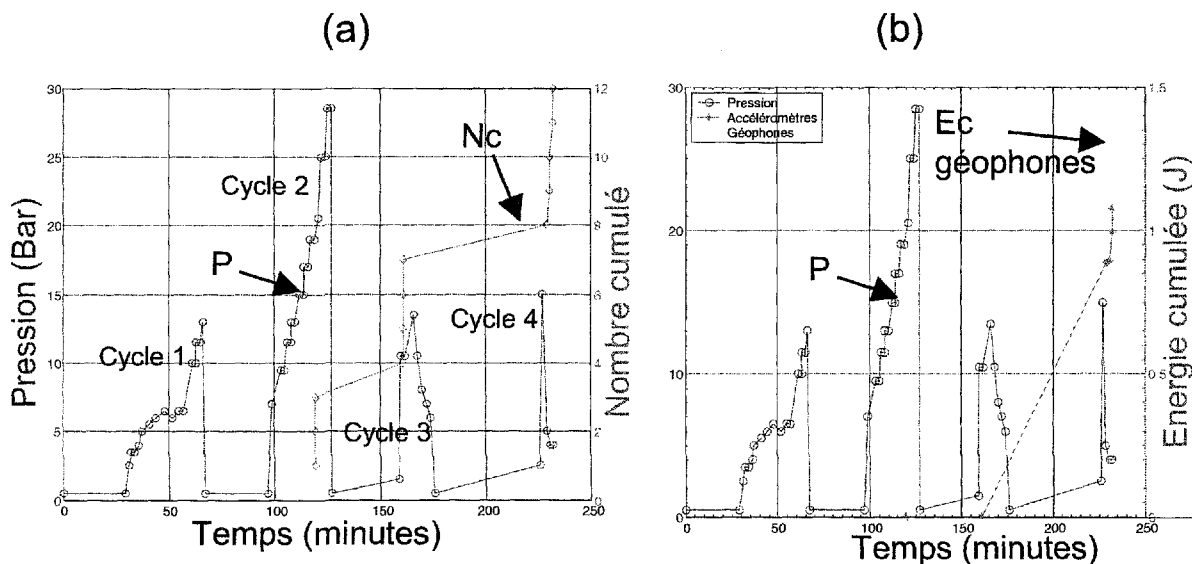


Figure 6. (a) Evolutions temporelles de la pression (P) dans le vérin et du nombre cumulé d'événements micro-sismiques (Nc) enregistrés durant l'expérimentation de chute de blocs. (b) Energies cumulées (Ec) des événements calculées à partir des signatures temporelles enregistrées par les accéléromètres et par les géophones.

La caractérisation des 12 événements enregistrés durant l'expérimentation par le couple ( $A_{max}, f_{max}$ ) indique que ce sont des événements basses fréquences ( $< 250$  Hz, figure 5a : cercles). On note également leur relative faible amplitude maximale. Ces événements ont été détectés par plus d'un géophones ainsi que par des accéléromètres, leur impact peut donc être considéré comme régional. La similarité entre ces 12 événements et ceux de la classe C enregistrés durant un an et demi sur le site pilote (événements d'impact régional basses fréquences), est ainsi assez franche en terme de contenu fréquentiel.



## 5. Observations sur site avant l'ennoyage et après le dénoyage du site

### 5.1 Avant l'ennoyage

La figure 7 illustre l'état de la zone d'expérimentation de la couche brune avant l'ennoyage (Al Heib, 2000). Les observations des carrefours où sont situés les stations géophones montrent que le secteur du capteur GL est particulièrement affecté par des fractures naturelles et des détériorations du toit, une zone assez importante de « toit détérioré » est aussi identifiée dans le secteur.

La pression induite par la mise en eau de la cavité a affecté particulièrement les zones préexistantes les plus instables. Ceci explique et confirme que ce soit justement ce secteur, identifié comme le plus instable avant l'ennoyage, qui est à l'origine d'une importante activité micro-sismique très localisée (événements de classe A enregistrés par le géophone GL).

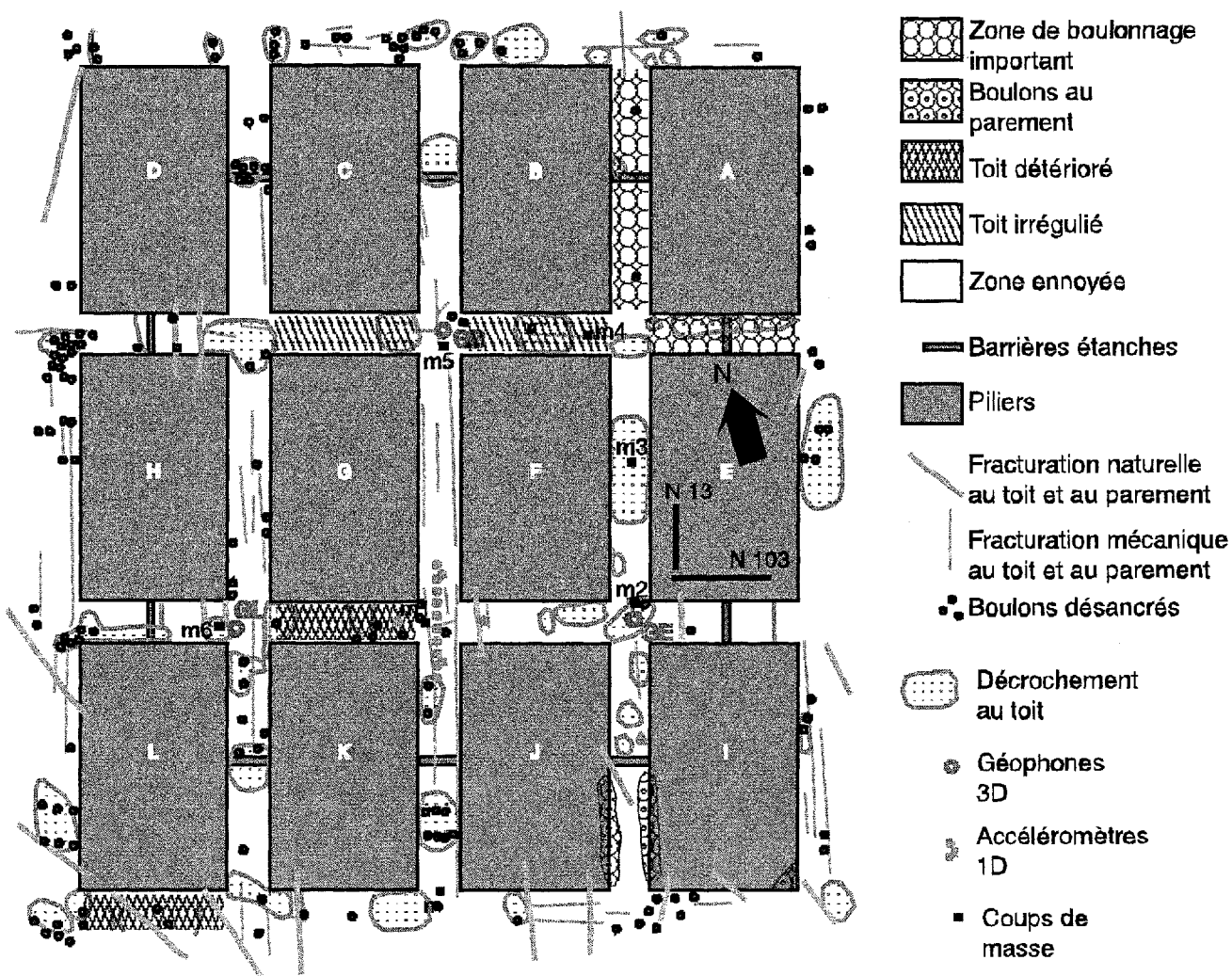


Figure 7. Schéma de l'état de la zone d'expérimentation de la couche brune avant l'ennoyage.

### 5.2 Après le dénoyage

Il a été observé (Schoumacker et Homand, 2003) que la plupart des blocs tombés se situent dans les secteurs identifiés avant l'ennoyage comme étant des « décrochements au toit » (secteurs au toit des galeries où les blocs étaient tombés naturellement ou par la purge). Les constatations effectuées après le dénoyage montrent que la quantité de blocs tombés (tas de blocs identifiés au sol) n'est pas particulièrement plus importante près du capteur GL, secteur avec une activité acoustique importante. Les tas de blocs les plus importants se situent vers le

capteur GE (figures 1, 3a et 7). Ces blocs identifiés sont pour l'essentiel constitués de petits morceaux.

L'activité acoustique identifiée dans le secteur du capteur GL ne serait ainsi pas associée aux vibrations générées par les chutes de blocs. La source serait plus particulièrement associée à des micro-ruptures induites par la pression d'eau dans la cavité ou à la réactivation et micro-glissements des fractures préexistantes sans qu'il y ait forcément décrochement de blocs. D'après les résultats issus de l'analyse des événements obtenus lors de l'expérimentation de chute provoquée de blocs, les décrochement de blocs ont sans doute été enregistrés au sein de la catégorie d'événements de classe C.

## 6. Conclusion

Une importante activité acoustique a été enregistrée pendant toute la durée des expérimentations d'ennoyage et de dénoyage du site expérimental de Tressange. L'étude de cette activité a montré une relation entre la mise en eau du site pilote de Tressange et l'apparition des événements microsismiques. L'analyse de l'évolution de cette activité microsismique montre que c'est particulièrement pendant la montée de l'eau dans la cavité, que les événements les plus forts apparaissent. Après la stabilisation du niveau d'eau, l'activité sismique continue et les événements sont plus nombreux mais beaucoup moins énergétiques que ceux enregistrés pendant la montée de l'eau.

La classification spatiale des événements, leur analyse fréquentielle, et les corrélations avec les observations sur site effectuées avant l'ennoyage et après le dénoyage ont permis de dégager principalement les conclusions suivantes :

- une zone du site pilote située dans l'intercalaire a été génératrice d'une importante activité micro-sismique. Le toit de ce secteur a été identifié par les observations effectuées avant l'ennoyage comme particulièrement détérioré. Par ailleurs, des fractures naturelles traversent le secteur. Il semblerait que l'eau ait réactivé des fractures préexistantes ou qu'elle ait créé de nouvelles fissures responsables de l'activité micro-sismique enregistrée dans ce secteur ;
- une seconde catégorie d'événements micro-sismiques, nettement différente de celle précédemment décrite, a aussi été enregistrée. L'analyse des signaux de cette catégorie d'événements a montré qu'ils seraient associés à des mécanismes de rupture d'impact plus régional (éventuellement venant des piliers ennoyés) ou à des processus de fracturation entraînant le décrochement de blocs comme semble l'indiquer l'analyse de l'activité micro-sismique liée à la chute provoquée de blocs.

## 7. Remerciements

Cette recherche a été effectuée dans le cadre du programme scientifique du GISOS et a été financée par le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, le Ministère de la Recherche, et par la Région Lorraine. Les auteurs remercient ces organisations pour l'aide financière et scientifique apportée, ainsi que l'ARBED pour l'appui technique lors des expérimentations effectuées sur le site de Tressange.

## 8. Références bibliographiques

- Al Heib M. (2000) Présentation du site pilote de Tressange (Moselle). *Rapport GISOS. Réf. INERIS-DRS-00-25300/RN05*.
- Gibowicz J.S. (1985) Seismic moment and seismic energy of mining tremors in the Lubin Copper Basin in Poland. *Acta Geophys. Pol.* 33, 243-257.
- Lopes B. (2002) Représentation en trois dimensions du site pilote de Tressange. *Rapport BRGM/RP-51832-FR GISOS*.
- Schoumacker L., Homand F. (2003) Premières constatations après vidange du site pilote de Tressange. *Rapport GISOS, réf. L.G.L.SOS.PSI.RPRE.03.0436.A.doc*.

- Senfaute G., Chambon C., Bigarre P., Guise Y., Josien J.P. (1997) Spatial Distribution of Mining tremors and Relationship to Rockburst. *Pure and Appl. Geophys.* 150. *Birkhäuser Verlag, Basel*, pp. 451-459.
- Spottiswoode S.M., McGarr A. (1975) Source parameters of tremors in a deep-level Gold Mine. *Bull. Seism Soc. Am.* 65, 93-112.